

森林・樹木における放射性セシウムの動態 (IV) — スギの樹幹木部および葉における ^{137}Cs とカリウム濃度との関係 —

Behavior of radiocesium in forest and tree (IV) — Relationship between concentration of ^{137}Cs and potassium in stem wood and leaves of sugi —

飯塚 和也¹・宮本 尚子²・大島 潤一¹・逢沢 峰昭¹・大久保 達弘¹・石栗 太¹・横田 信三¹

Kazuya IIZUKA¹, Naoko MIYAMOTO², Junichi OSHIMA¹, Mineaki AIZAWA¹,

Tatsuhiko OHKUBO¹, Futoshi ISHIGURI¹, Shinso YOKOTA¹

¹ 宇都宮大学農学部 〒 321-8505 栃木県宇都宮市峰町 350

¹ Faculty of Agriculture, Utsunomiya University 321-8505, Japan

² 森林総合研究所林木育種センター東北育種場 〒 020-0621 岩手県滝沢市大崎 95

Tohoku Regional Breeding Office, Forest Tree breeding center, Forestry and Forest Products Research Institute, Japan

1. はじめに

筆者らは、2011 年 3 月に発生した福島原子力発電所の事故に由来した放射性降下物による環境への影響、特に、森林・樹木を対象に放射性セシウムの動態に関する実態調査を進めている^{1,2,3,4)}。

本報告では、スギの樹幹木部および葉における放射性セシウムである ^{137}Cs とカリウムの関係を検討した。まず、スギクロンを供試し、樹幹木部の心材における材色、含水率およびカリウムの形質間の相互関係、ならびに諸形質のクロン間差を調査した。また、木部の灰分とカリウムの関係を明らかにした。つぎに、実生スギを用い、心材色と含水率を考慮して、 ^{137}Cs とカリウムについて樹幹木部の半径方向の濃度分布のパターンを検討した。

葉については、主伐後の裸地状態の林地にフォールアウト直後の 2011 年 5 月に植栽され、 ^{137}Cs の経根吸収により放射能汚染されていることが確認されているスギ⁴⁾ を供試とした。4 成長期後の植栽木において、2012 年に伸長成長した主幹から展開している 3 年生枝の枝齢別に、葉の ^{137}Cs とカリウム濃度に関して調査した。

2. 材料と方法

材料の非放射能汚染(セシウムフリー)のスギクロンは、茨城県水戸市に設定されていた旧関東林木育種場に集植されて、1994 年に伐採された林齢約 30 年のスギ精英樹クロンである。地上高 1.6 m 部位の樹幹木部の含水率、心材色 (L* 値)、K (g / kg dw) および ^{40}K (Bq / kg dw) ならびに木部の灰分量 (%) を測定した。

^{137}Cs に汚染された実生スギ³⁾ は、2011 年 3 月に事故を起こした東京電力福島第一原子力発電所から南

西方向に約 130km に位置する栃木県塩谷町に設定されている宇都宮大学農学部附属演習林から供試した。2013 年 1 月に林齢 40 年のスギ (4 林班た小班) および 2014 年 1 月に林齢 61 年のスギ (4 林班よ小班) を対象に、それぞれ、地上高 0.3 ~ 0.5 m 部位の樹幹木部の ^{137}Cs (Bq / kg dw)、含水率、心材色 (L* 値) および ^{40}K (Bq / kg dw) を測定した。

葉の調査は、2011 年 5 月に各家系の個体が単木混交で植栽された若齢なスギを供試した。調査地は、フォールアウトがあった 2011 年 3 月 15 日時点¹⁾ で、皆伐終了後のため裸地状態であった。また、それ以降、栃木県では放射性降下物は報告されていないため、調査地の植物体に存在する放射性物質は、経根吸収に起因するものと考えられる。

外見上、健全に生育している 12 家系について各 3 個体の計 36 個体を調査対象とした。4 成長期を経た 2015 年 5 月に、2012 年に伸長した主幹から展開した 3 年生枝を樹幹基部から切り取り、1 個体当たり 4 ~ 6 本の枝を採取した。つぎに、1 年生枝 (2014 年に伸長した枝)、2 年生枝 (2013 年に伸長した枝) および 3 年生枝 (2012 年に主幹から展開した枝) について、それぞれの部位の枝に着生している葉 (以下、「1 年枝の葉 (1BL)」、「2 年枝の葉 (2BL)」および「3 年枝の葉 (3BL)」とする。) の ^{137}Cs 濃度および灰分量から試算した K 濃度を測定した。

材色は L*a*b* 表色系により、心材色の明度 (L* 値) を対象に色彩色差計 (コニカミノルタ, CR-400) を用い、材面を平滑に処理したまき目面を測定した。本研究では材色は、明度を示す L* 値を用いた。

含水率は、常法により全乾燥重量ベースで算出した。

^{137}Cs 濃度の測定用の試料は、全乾状態で粉碎して U-8 プラ容器に充填した。宇都宮大学バイオサイエン

ス教育研究センター RI 施設に設置してあるゲルマニウム半導体検出器 (ORTEC, SEIKO EG & G) を使用し、 ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{40}K の核種ごとに、濃度 (Bq / kg dw) を測定した。測定した試料の放射性核種の濃度は、採取日で半減期補正を行っている。なお、測定時間は、2000 ~ 40000 秒である。

原子吸光法による K (g / kg dw) の測定用の材料は、木部で 30 サンプル、葉で 10 サンプルとした。木部は心材と辺材、それぞれ 15 個体とした。まず、全乾燥サンプル 0.05g を入れたるつぼを、電気マッフル炉 (ADVANTEC, FUL220FA) で 500℃, 24 時間で灰化した。つぎに、灰化したサンプルを 0.1mol / L の塩酸に溶解させ、メスラスコ (25ml, 50ml) に希釈し、ろ紙 (ADVANTEC No.5B) を用いて、ろ過した。また、Litter では、試験管を用いて、そのろ紙をさらに希釈 (塩酸 3ml, ろ液 1ml) をした。その溶液を、原子吸光度計 (HITACHI Z-6100) を用いて測定を行った。つぎの式により K 濃度を算出した。

$$\text{K 濃度 (g / kg dw)} = \text{原子吸光測定 (mg / L)} \times \text{希釈倍率} \times (\text{メスラスコ} / 1000 \text{ L}) / \text{サンプル量}$$

灰分量は、原子吸光法で K 濃度を測定したサンプルを供試した。全乾燥状態の木部で 0.5g および葉で 0.1 g を、それぞれ、マッフル炉 (YAMATO, FO100) で 500℃, 24 時間で灰化して、算出した。さらに、葉の灰分量について、前述した 2011 年 5 月に植栽された若齢なスギの 36 個体の枝齢別 3 部位の計 108 サンプルを測定した。

3. 結果と考察

3.1 セシウムフリーのスギクローンに関する測定

スギクローンを供試した心材の L* 値、含水率および心・辺材の K (g / kg dw) と ^{40}K (Bq / kg dw) の測定、また木部の灰分量と K 濃度の関係を検討した。

3.1.1 形質の測定結果とクローン間差

形質ごとの測定と分散分析の結果を表-1 に示した。測定した形質により 6 ~ 13 クローン数は異なるが、辺材のカリウム濃度以外の全ての形質、つまり心材の L* 値、含水率、カリウム濃度および心・辺材の

^{40}K 濃度にクリーン間差 ($p < 0.01$) が認められた。これらは遺伝的要因の寄与の大きな形質であることが示唆された。

3.1.2 心材における形質間の相関関係

K を測定した 15 個体 (7 クローン) および K を測定した以外の 13 個体 (6 クローン) の ^{40}K について、それぞれ L* 値と含水率との相関係数を表-2 に示した。L* 値は、含水率、K ならびに ^{40}K との間に有意な負の相関が認められた。また、含水率は、K ならびに ^{40}K との間に有意な正の相関が認められた。

以上の結果から、心材において、L* 値、含水率、K ならびに ^{40}K はクローンにより特定の値を有するとともに、それぞれの形質の間に関連性があることが示された。また、K と ^{40}K の樹幹木部における挙動に同位体効果はないという報告⁵⁾と、同様な知見が得られた。

表-2 形質間の相関係数

Factor	L*	MC	K
L*	1.000		
MC	-0.617 *	1.000	
K	-0.897 **	0.688 **	1.000

Note: n=15; **, signficance at 1% level;
*, signficance at 5 % level.

Factor	L*	MC	^{40}K
L*	1.000		
MC	-0.868 **	1.000	
^{40}K	-0.823 **	0.822 **	1.000

Note: n=13; **, signficance at 1% level.

3.1.3 灰分量と K 濃度の関係

表-1 で示した原子吸光法でカリウムを測定した 15 個体 (7 クローン) について、心材と辺材に区分した計 30 サンプルの灰分量と K 濃度の関係を図-1 に示した。灰分量の平均値は 0.49 ± 0.27 (%), K 濃度の平均値は 2.0 ± 1.3 (g / kg dw) であった。灰分量 (y) と K 量 (x) との間には、回帰式 $y = 4.462x - 0.122$ (n=30,

表-1 スギクローンに関する測定および分散分析の結果

Factor	Traits	Unit	Result of mesurements				Result of ANOVA	
			Mean	SD	Min.	Max.	Degee of freedom	
							among clone	within clone
HW	L*		63.82	3.92	56.52	69.92	12	18
	MC	%	169	65	83	263	11	16
HW SW	K	g/kg dw	3.1	1.0	1.8	4.5	6	8
			1.0	0.3	0.6	1.4	6	8
HW SW	^{40}K	Bq/kg dw	420	78	330	512	5	10
			387	62	322	462	5	10

Note: ANOVA, analysis of variance; HW, heartwood; SW, sapwood; SD, standard deviation;

MC, moisture content; L*, Lightness; **, significance at 1% level; ns, no significance.

$R^2 = 0.93$) の関係が得られた。このため、灰分量と K 濃度の間に密接な関係があることが認められた。スギ品種を供試した研究⁶⁾と同様な結果となり、灰分量が K 濃度の指標になることが示された。

3.2 演習林産の実生スギ

3.2.1 2つの林分における樹幹木部の ^{137}Cs 濃度

2013 年 1 月に採取した林齢 40 年のスギ 40 個体について、髄を中心とした扇形の試験体から心・辺材別に測定した含水率の分布を図-2 に示した。含水率は、心材で 153% (± 57)、辺材で 250% (± 33) であった。

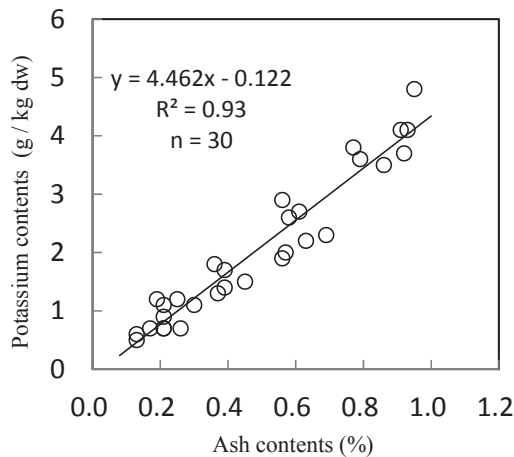


図-1 心・辺材を併せた木部の灰分量とカリウム濃度の関係

変動係数を見ると、心材で 37%、辺材で 13% であり、心材含水率のバラツキが大きいことが示された。この結果は、一般的に知られているスギの含水率に関する特徴を示している。

これらのスギのうち任意の 20 個体ならびに 2015 年 1 月に採取した林齢 61 年の 20 個体において、心材の含水率、L* 値および心・辺材の ^{137}Cs と ^{40}K の濃度の測定結果を表-3 に、また、各形質間の相関係数を表-4 に示した。

福島原発事故後 1 年 10 ヶ月後の林齢 40 年のスギについて、心材において明度は、前述した 3.1.2 と同様

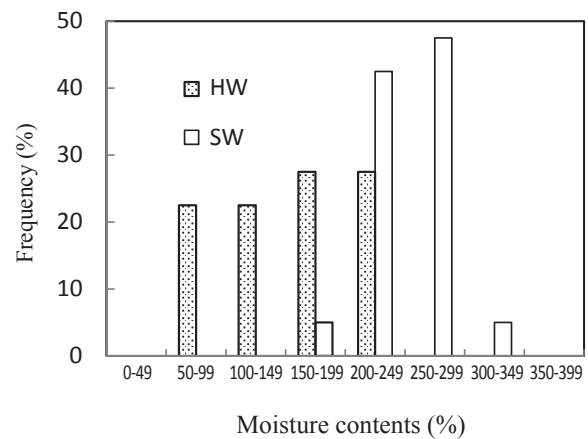


図-2 林齢 40 年のスギの心・辺材別の含水率の頻度分布

表-3 林齢と調査年の異なる 2 林分の諸形質の測定結果

Collection period	age	n	Factor	HW				SW			
				L*	MC	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	MC	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	
					(%)	(Bq/kg dw)			(%)	(Bq/kg dw)	
2013.1	40	20	Mean	60.45	165	20	471	242	17	415	
			SD	5.43	50	7	80	34	8	49	
2015.1	61	20	Mean	63.90	120	18	400	209	12	378	
			SD	6.33	51	12	59	46	5	52	

Note: n, number of samples.

表-4 2 林分における形質間の相関係数

40-year-old							
Factor	L*	MC	^{40}K	^{137}Cs			
L*	1.000						
MC	-0.858 **	1.000					
^{40}K	-0.477 *	0.526 *	1.000				
^{137}Cs	-0.563 **	0.581 **	0.537 *	1.000			

Note: n=20; **, significance at 1% level;
*, significance at 5% level.

61-year-old							
Factor	L*	MC	^{40}K	^{137}Cs			
L*	1.000						
MC	-0.822 **	1.000					
^{40}K	-0.526 *	0.594 **	1.000				
^{137}Cs	-0.436 ns	0.281 ns	0.331 ns	1.000			

Note: n=20; **, significance at 1% level;
*, significance at 5% level; ns, no significance.

に含水率、 ^{40}K 濃度との間に有意な負の相関が、また、 ^{137}Cs 濃度は、 L^* 値との間に有意な負の相関、そして含水率と ^{40}K との間に有意な正の相関が認められた。一方、福島原発事故後 3 年 10 ヶ月後の林齢 61 年のスギでは、心材において、 L^* 値は、含水率と ^{40}K との間に有意な負の相関が認められた。しかしながら、 ^{137}Cs 濃度については、 L^* 値、含水率および ^{40}K 濃度の間に有意な相関関係が確認できなかった。 L^* 値が高く、含水率および ^{40}K 濃度が低い値を示しても、必ずしも ^{137}Cs 濃度が相対的に低くない個体が存在していた。福島原発事故後の時間の推移とともに、樹体内に吸収された ^{137}Cs は、木部の辺材仮道管や放射柔組織を通じ、樹幹主軸および半径方向に循環しており、また、枝葉へと移動することが推測される。この物質循環の過程で、樹体内の ^{137}Cs 量が同じでも、成長が良好な樹体の大きな個体は、材積が高く、枝葉への移動量が多くなることで、樹幹木部の濃度が低くなる可能性が考えられる。また、 ^{137}Cs は、半径方向の辺材から心材への移動速度が K 濃度に影響されるため、現時点において K 濃度が高い個体の順から心材の濃度が高くなる傾向があることも推察される。このため、福島原発事故後 3 年 10 ヶ月後の林齢 61 年のスギでは、事故後 1 年 10 ヶ月後の林齢 40 年と同様な ^{137}Cs 濃度と L^* 値、含水率および ^{40}K 濃度の関係が得られなかったことが推察される。

3.2.2 林齢 40 年における ^{137}Cs 濃度の半径方向の変動パターン

2013 年 1 月にサンプリングした林齢 40 年のスギ 40 個体のうち、心材含水率が偏らないように 20 個体を選定し、 L^* 値を測定した。つぎに、髓から樹皮に向かう半径方向において、心材では 3 等分 (H1, H2, H3)、辺材では 2 等分 (S1, S2) に区分し、 ^{137}Cs 濃度と ^{40}K 濃度を測定し、それらの結果を表 5 に示した。両放射性核種ともに、測定部位の中で H3 が最も高い濃度を示した。

つぎに、心材の平均含水率の平均値 152%, 標準偏差 57% を考慮して、心材含水率が 100% 以下の個体 (以下、「低含水率グループ (LMG)」とする。) と 200% 以上の個体 (以下、「高含水率グループ (HMG)」とする。) の 2 区分し、それぞれ 6 個体のグループに分けられた。LMG は、平均の心材含水率で 76 (± 17) %, 辺材含水率で 224 (± 21) %, 心材の L^* 値で 68.62 (± 1.65) を示し、HMG では、それぞれ 213 (± 9) %, 252 (± 36) %, 58.91 (± 3.07) の値を得た。

異なる心材含水率で区分した両グループでは、辺材

含水率の間に有意差が認められなかった。一方、心材の L^* 値をみると、LMG では HMG と比べ有意に高い値を示した。このことは前述した 3.1 に示した、心材では含水率が低いと L^* 値が高くなる特徴を裏付ける結果であった。2 グループの ^{137}Cs と ^{40}K に関する半径方向の推移を図 3 に示した。 ^{137}Cs 濃度の半径方向パターンは、両グループともに、心材と辺材の隣接部位が高く、髓に向かうに伴い低い値を示すという、類似した傾向を示した。つぎに、辺材では、両グループの ^{137}Cs と ^{40}K ともに、同様な数値と変動パターンを示した。心材では、LMG では HMG と比べ両放射性核種ともに低い値で推移し、 ^{137}Cs 濃度は ^{40}K 濃度と類似した変動パターンを示すことが示唆された。しかしながら、髓周辺の部位では、 ^{137}Cs 濃度は ^{40}K 濃度に比べて、低下率が高い傾向が見られる。

フォールアウト直後の ^{137}Cs は、樹冠を構成する枝葉や樹皮に沈着し木部へ、そして辺材から心材に徐々に移行が進行中であり、現在でも木部内の ^{137}Cs 濃度は、平衡状態ではないことが推察される。一方、カリウムは、樹木の成長とともに経根吸収され、樹体内に移行し、木部内での濃度が平衡状態に保たれていることが考えられる。1979 年に伐採された年輪数 115 のスギの ^{137}Cs と ^{40}K 濃度は、辺材部から辺心材境界にか

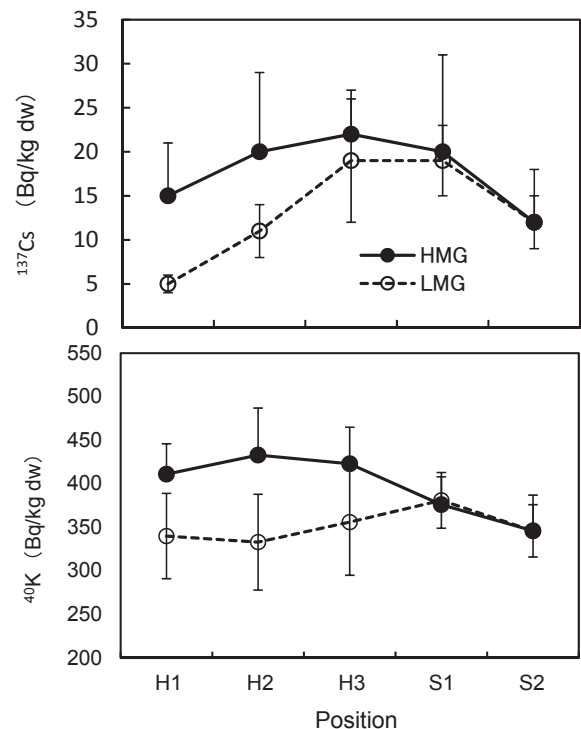


図 3 含水率で区分した 2 グループの ^{137}Cs および ^{40}K 濃度の半径方向の推移

Note: HMG, High Moisture content Group;
LMG, Low Moisture content Group;
Error bar, SD.

表 5 ^{137}Cs と ^{40}K 濃度の半径方向の推移

Factor	MC (%)		L*	¹³⁷ Cs (Bq/kg dw)						⁴⁰ K (Bq/kg dw)					
	HW	SW		HW	H1	H2	H3	S1	S2	H1	H2	H3	S1	S2	
Mean	152	247	62.16	13	18	22	18	13	379	389	417	378	357		
SD	57	29	5.54	8	9	7	7	4	55	65	72	38	55		

Note: n=20.

けて大きく変化するが、心材部ではほぼ一定の値を示すことが報告⁵⁾されている。このため、供試木はフォールアウトから1年10ヵ月後であり、今後時間を経るとともに、心材の¹³⁷Cs濃度はほぼ一定になっていくことが考えられる。

3.3 経根吸収された放射性核種の葉における濃度の測定結果

3.3.1 葉のK濃度の推定

葉のK濃度の推定をするため、灰分量(%)と原子吸光法で測定したK濃度(g/kg dw)の関係を図-4に示した。灰分量(y)とK濃度(x)の間に、回帰式 $y = 3.435x - 3.949$ (n = 10, $R^2 = 0.89$)の関係が得られた。このため、葉についても、灰分量とK濃度に密接な関係があることが認められた。

そこで、2011年5月に植栽後4成長期を経た2015年5月に、2012年に伸長成長した樹幹から展開した3年生枝を供試した、部位ごとの葉、1年枝、2年枝および3年枝の葉の各36個体計108サンプルについて、灰分量(2.2 ± 0.5 (%))から得られた回帰式により、K濃度を推定した。その結果を図-5に示した。推定されたK濃度は、各部位の平均値は 3.5 ± 1.8 (g/kg dw)の範囲にあった。スギ成木2個体の葉に無機物に関する研究において、当年開葉した新葉では、開葉当時の

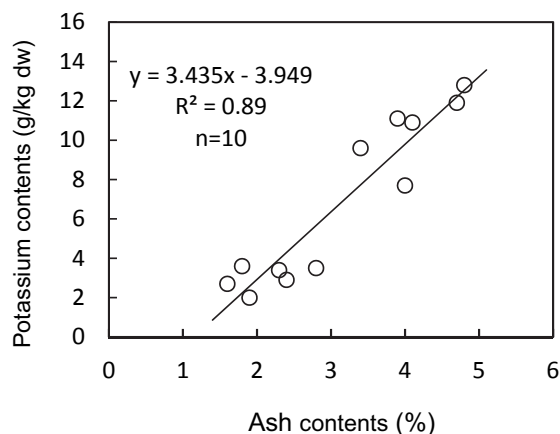


図-4 葉における灰分量とカリウム濃度の関係

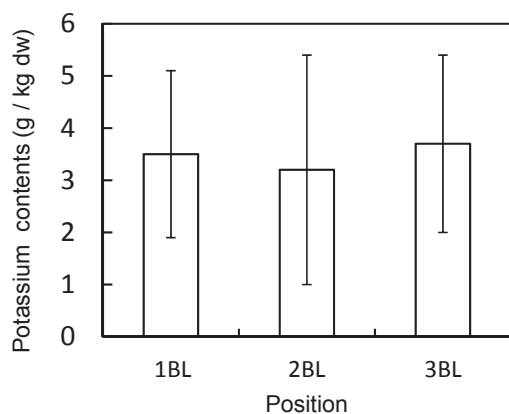


図-5 3年生枝の枝齢別の葉におけるカリウム濃度

Note: 1BL, Leaves of 1-year-old branch;
2BL, Leaves of 2-year-old branch;
3BL, Leaves of 3-year-old branch;
Error bar, SD.

K濃度は最も高く、その後減少し安定した値を示し、1年葉ではK濃度は季節変動が少なく、5月の測定では $3.3 \sim 4.5$ (mg/g)と報告⁷⁾されている。本研究のK濃度は、既往の値とほぼ同様な範囲であったと考えられる。

葉のK濃度に関する分散分析により、枝齢の間には有意差は認められなかった。このため、3年生枝の枝齢別に展開した葉のK濃度には、統計的な有意差が存在しないことが示唆された。

3.3.2 葉の¹³⁷Cs濃度

前述した3.3.1の1年枝、2年枝および3年枝の葉における¹³⁷Cs濃度の測定結果を表-6に、二元配置の分散分析の結果を表-7に示した。家系間および枝齢の間に、有意差が認められた。枝の先端部位に相当する1年枝の葉が平均値285 Bq/kg dwで最も高い値

表-6 3年生枝の枝齢別の葉における¹³⁷Cs濃度

Factor	Position of the leaf		
	Age of the branch		
	1	2	3
Mean	285	125	154
SD	181	77	84
Max.	700	306	323
Min.	45	22	23

Note: unit, Bq/kg dw.

表-7 12家系の枝齢別の¹³⁷Cs濃度に関する分散分析の結果

	DoF	F-value
Family	11	11.312 **
Position	2	36.312 **
Interaction	22	1.069 ns
Error	72	
Total	107	

Note: DoF, Degree of freedom

**, significance at 1% level; ns, no significance.

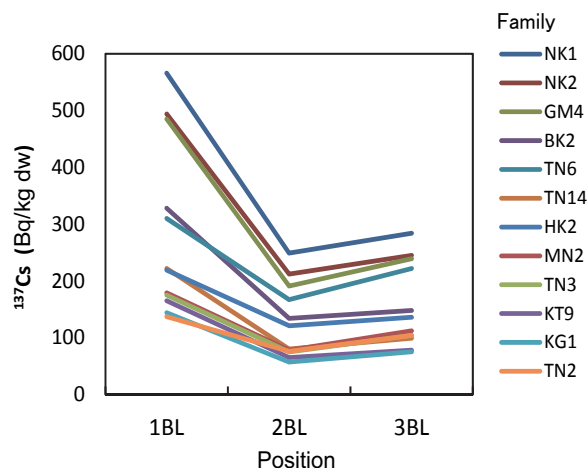


図-6 12家系の3年生枝における枝齢別の葉の¹³⁷Cs濃度

を示した。また、家系と枝齢との間に交互作用は認められなかった。 ^{137}Cs 濃度について、12 家系の枝齢別の関係を図-6 に示した。枝齢別における家系ごとの葉の ^{137}Cs 濃度の順は、交互作用が存在しないため、ほぼ規則的であった。

3.3.3 葉における ^{137}Cs 濃度と K 濃度との関係

植物体において、一般的に ^{137}Cs は K と類似した挙動を示すことが知られている。一方、森林生態系では、両放射性核種の間には関係性が見られず、これらの動態はそれぞれ独立であることが報告⁸⁾ されている。

そこで、本研究における葉における ^{137}Cs 濃度と K 濃度との関係を検討した。まず、葉の ^{137}Cs 濃度は、枝の先端部である 1 年枝の葉が最も高い値を示し、枝齢により有意差が認められた。このため、葉の展開している枝齢の間に濃度勾配が存在することが明らかになった。一方、K 濃度では部位間に有意差が見られず、 ^{137}Cs 濃度とは異なる分布パターンであることが示唆された。また、葉の ^{137}Cs 濃度と K 濃度との間には、枝齢別の部位においても有意な相関関係は確認されなかった。しかしながら、本研究では、1 成長期以降の枝に着生している葉を対象としたものであり、展開中の新葉に関する ^{137}Cs と K の関係を検討していない。落葉樹のコナラ等では常緑樹と異なり、毎年葉が入れ替わる。スギの新葉の K 濃度に季節変化があることが報告⁷⁾ されており、落葉樹との比較のためにも、展開中の新葉の両放射性核種の関係を明らかにすることが必要である。

以上のことから、1 成長期以上を過ぎた 3 年生枝のそれぞれの枝齢別部位の葉において、 ^{137}Cs と K は異なる濃度分布パターンを示し、両放射性核種は、類似した挙動をしていない可能性が示された。

4. まとめ

スギの樹幹木部と葉における ^{137}Cs 濃度とカリウム濃度との関係を調査した。得られた主な結果は、以下のとおりである。

- ① 樹幹木部の心材において、含水率は、材色 (L* 値) との間に負の相関、カリウム (K および ^{40}K) 濃度との間に正の相関が再確認された。
- ② 汚染されたスギ心材においても、 ^{137}Cs 濃度は、材色 (L* 値) との間に負の相関、含水率とカリウム (K および ^{40}K) 濃度との間に正の相関が認められた。辺材から心材への移行する ^{137}Cs は、カリウム濃度と関連した動きをしていることが示唆された。
- ③ しかしながら、2015 年 1 月における林齢 61 年の林分では、心材の ^{137}Cs 濃度には、材色 (L* 値)、含水率および ^{40}K 濃度との間には上記の①の関係が認められなかった。このことは、森林内の ^{137}Cs 濃度の分布が不均一で偏りがあり、また、供試木の樹体の大きさが異なり、かつ吸収された ^{137}Cs 濃度が低いことなどが、その要因のひとつであると推察される。
- ④ ^{137}Cs を経根吸収している 4 年生スギの 3 年生枝の葉について、1 年枝の葉が、2 と 3 年枝の葉と比べ最も高い濃度を示した。また、3 枝齢部位の全ての部

位の葉に家系間差が認められ、また家系と枝齢別の間に交互作用が認められなかった。樹体に吸収された ^{137}Cs は、比較的規則的な移行のパターンを示している可能性があることが推察される。

- ⑤ 葉に存在する K 濃度は、3 年生枝の葉の枝齢別部位の間に有意差が認められなかった。このため、1 成長期以上を過ぎた各年齢の枝の葉に存在する ^{137}Cs とカリウムは、類似した濃度分布パターンを示さない可能性が推察された。

謝辞

本研究のカリウム濃度の分析に当たり、宇都宮大学大学院農学研究科生物生産科学専攻の吉田英晴氏に多大なる協力を頂きました。心よりお礼申し上げます。なお、本研究は JSPS 科研費 24110001、26340083 および 15K07494 の助成を受けたものである。

引用文献

- 1) 飯塚和也・大島潤一・逢沢峰昭・大久保達弘・石栗 太・横田信三 (2015) 森林・樹木における放射性セシウムの動態 (Ⅲ) - スギの苗木および幼齢木における放射性セシウムの経根吸収 -。宇都宮大学農学部演習林報告 51: 33-36.
- 2) 飯塚和也・相蘇春菜・高嶋有哉・逢沢峰昭・大久保達弘・石栗 太・横田信三 (2014) 森林・樹木における放射性セシウムの動態 (Ⅱ) - 宇都宮大学演習林におけるスギ材と放射性セシウムの関係 -。宇都宮大学農学部演習林報告 50: 91-93.
- 3) 飯塚和也・篠田俊信・関 菜穂子・牧野和子・逢沢峰昭・大久保達弘・石栗 太・横田信三・吉澤伸夫 (2013) 森林・樹木における放射性セシウムの動態 (Ⅰ) - 福島原発事故後 10 ヶ月間の宇都宮大学演習林における記録 -。宇都宮大学農学部演習林報告 49: 77-80.
- 4) 飯塚和也・篠田俊信・石栗 太・横田信三・吉澤伸夫 (2012) 福島原発事故後 10 ヶ月間の栃木県における空間放射線量率の記録。宇都宮大学農学部演習林報告 48: 161-164.
- 5) 片山幸士・岡田直紀・石丸 優・野淵 正・青木 敦 (1986) スギ樹幹中での放射性核種の挙動。RADIOISOTOPES 35: 636-638.
- 6) 森川 岳・小田一幸・村松順司・堤 壽一 (1996) スギ樹幹における黒心材形成と灰分 (第 2 報) スギ 3 品種心材の性質。九州大学農学部演習林報告 74: 41-49.
- 7) 坪内 彰・前川 勉・日吉三郎・植山洋一・久嶋鉄郎 (1993) 樹木葉中成分濃度の季節変化について (第 3 報) - スギ葉中成分について -。福井県環境センター年報 73: 53-62.
- 8) 鈴木隆央・宮田能寛・村上正志・石井伸昌・田野井慶太郎・広瀬 農・大手信人 (2015) 福島第一原発事故から放出された放射性セシウムの森林生態系における生物動態。日本生態学会第 62 回全国大会講演要旨。